

贵州红枫湖水体理化特征及其对浮游植物群落的影响

金祖雪^{1,2} 王敬富^{2*} 李秋华³ 张瑞雪¹ 刘勇² 余萍萍^{1,2} 陈权² 陈敬安²

(¹贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; ²中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

³贵州师范大学贵州省山地环境信息系统和生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001)

摘要 为了解红枫湖水体理化特征与浮游植物结构群落变化关系,于2014年1—12月对红枫湖大坝、花鱼洞、后午等采样点进行了月度野外采样监测与室内分析。应用综合营养状态指数(TLI)、藻类丰度与湖泊营养类型的评价标准对红枫湖水体营养状态进行评价,对主要水体理化特征与浮游藻类丰度的关系进行分析。结果表明:1)共鉴定出浮游植物7门,105种(属),主要为蓝藻、绿藻和硅藻。2)全年藻类丰度呈现出春季、秋季两个峰值,多数月份以蓝藻门的假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)为主,以绿藻门的双对珊藻(*Scenedesmus bijugatus*)、小球藻(*Chlorella vulgaris*)及硅藻门中的小环藻(*Cyclotella* sp.)为辅。3)红枫湖水体处于中营养-中度富营养化状态。4)相关性分析表明,水温、溶解氧、总氮、透明度是红枫湖藻类丰度的主要影响因素。本研究为红枫湖水环境保护和富营养化治理提供了重要的科学基础。

关键词 红枫湖; 水体理化特征; 浮游植物; 相关性分析

Effects of physicochemical characteristics of water body on phytoplankton community in Hongfeng Lake in Guizhou Province. JIN Zu-xue^{1,2}, WANG Jing-fu^{2*}, LI Qiu-hua³, ZHANG Rui-xue¹, LIU Yong², YU Ping-ping^{1,2}, CHEN Quan², CHEN Jing-an² (¹College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025 China; ²State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ³Guizhou Key Laboratory for Mountainous Environmental Information and Ecological Protection, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China).

Abstract: To clarify the relationship between water physicochemical characteristics and phytoplankton community in Hongfeng Lake, water samples were monthly collected and analyzed at three sites (DB, HYD, and HW) in 2014. The trophic level index (TLI), algal abundance, and evaluation criteria for lake trophic type were used to evaluate the eutrophic level of Hongfeng Lake. The correlation between environmental factors and the abundance of phytoplankton were analyzed. The results showed that: (1) A total of 105 species (belonging to seven phyla) of phytoplankton were identified in the lake, dominated by cyanobacteria, green algae, and diatom. (2) Algae abundance peaked in spring and autumn, with *Pseudanabaena* sp. being the dominant species in most months, followed by *Scenedesmus bijugatus*, *Chlorella vulgaris* and *Cyclotella* sp. (3) The eutrophic level of Hongfeng Lake ranged from mesotrophic to moderate eutrophication. (4) Results of correlation analysis showed that water temperature, dissolved oxygen, total nitrogen concentration, and water transparency were the major factors influencing the abundance of algae. Our results provide important scientific foundation for water environment protection and eutrophication control in Hongfeng Lake.

Key words: Hongfeng Lake; physicochemical characteristics of water body; phytoplankton; correlation analysis.

国家自然科学基金项目(41773145)、国家自然科学基金委员会-贵州喀斯特科学研究中心联合基金项目(U1612441)、广西科技重大专项(桂科AA17204078)和贵阳市科技项目(筑科合同[2019]2-9)联合资助。

收稿日期: 2019-04-22 接受日期: 2019-11-04

* 通讯作者 E-mail: wangjingfu@vip.skleg.cn

水华的频繁发生是水体富营养化带来的最严峻问题之一,大面积的水华不仅会使水体质量严重下降,还会对水生生物甚至水生生态系统构成严重威胁(Landsberg *et al.*, 2002; 王扬才等, 2004; 吴庆龙等, 2008)。

蓝藻水华仍是当前及未来相当长一段时间的重大环境问题。蓝藻通过产生藻毒素与其自身死亡分解使水体缺氧都会导致鱼类大量死亡,不仅饮用水安全受到威胁,生态系统平衡也会受到破坏,由此引发了越来越多国内外学者的关注。几乎全世界主要水系都发生过蓝藻水华,包括北美的伊利湖、欧洲的波罗的海、非洲的维多利亚湖等(Paerl *et al.*, 2008)。Dokulil等(2000)通过分析原始数据、文献资料及蓝藻优势的产生机制得出,蓝藻长期优势是由光照、水温、营养物质浓度、湖泊形态等因素共同决定。对蓝藻水华形成的物理、化学及生物等环境因素进行分析,提出蓝藻生长与水华的形成可以分为休眠、复苏、生物量增加、上浮和积聚形成水华的4个主要阶段(孔繁翔等, 2005)。当前学者对蓝藻水华的研究主要集中于浮游植物功能群的组成及其与环境因子之间的关系(Straková *et al.*, 2013; Cui *et al.*, 2018; 王徐林等, 2018; 闫苏苏等, 2018)。

周期性的水体理化特征和浮游植物群落结构的调查分析,是科学评价水质现状、水质演化规律和水质预测预警的重要基础(Gabyshev *et al.*, 2010; 贺蓉等, 2015)。浮游植物作为淡水生态系统的主要初级生产者,扮演着至关重要的角色,其种群结构变化能够直接、迅速地反映水质的变化(Reynolds, 2006; 闵文武等, 2015)。浮游植物丰度可以指示湖泊的营养状态,是评价水生生态系统环境质量的重要依据(Liu *et al.*, 2016; Biggs *et al.*, 2017)。以往研究侧重水体理化特征或者浮游植物群落结构的单一因素研究(晏妮等, 2006; 高远等, 2008; 李林衡等, 2016; 鲍广强等, 2018),而对水体理化特征与浮游植物群落两者之间的协同关系研究不够深入。为此,本研究通过对红枫湖3个监测点水体理化特征和浮游植物群落结构的系统采样分析,探讨水体理化特征与浮游植物群落结构变化之间的相互关系,为红枫湖的水环境保护决策提供科学基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况及采样点的设置

红枫湖(106°19'E—106°28'E, 26°26'N—26°35'N)

位于贵州省中部,是猫跳河梯级电站的龙头水库,于1960年建成,是贵州省贵阳市的主要饮用水源地之一。红枫湖湖面面积为57.2 km²,总库容6.01亿 m³,最大水深45 m,平均水深10.5 m,入湖河流主要包括羊昌河、后六河、麻线河、麦翁河。红枫湖流域属亚热带季风气候,年平均气温为14.4℃,其中最高气温(7月)平均温度为22.7℃,最低气温(1月)为4.1℃(杨通铨等, 2014; 徐洋等, 2016)。

随着城市化的快速发展,红枫湖受流域工农业废水排放的影响,水环境污染日趋严重,主要表现为营养盐与石油类超标,2003—2007年水质以IV—V类为主,2008年后,因采取加强对工农业污染源的排放管理、实施红枫湖水质改善治理工程等措施,水质逐步改善(孟凡丽等, 2018a, 2018b)。2013年以来,随着外源污染输入量的减少、农业产业结构的调整、相关工程项目的治理,红枫湖水质基本稳定在Ⅲ类(杨通铨等, 2014; 徐洋等, 2016)。但在局部湖区和局部时段,仍偶有水华和突发性水质恶化事件发生,水质稳定达标仍面临不小挑战。

2014年1—12月进行为期12个月表层水样采集,根据红枫湖自身特点分别设置大坝(DB)、花渔洞(HYD)、后午(HW)等3个采样点位如图1。

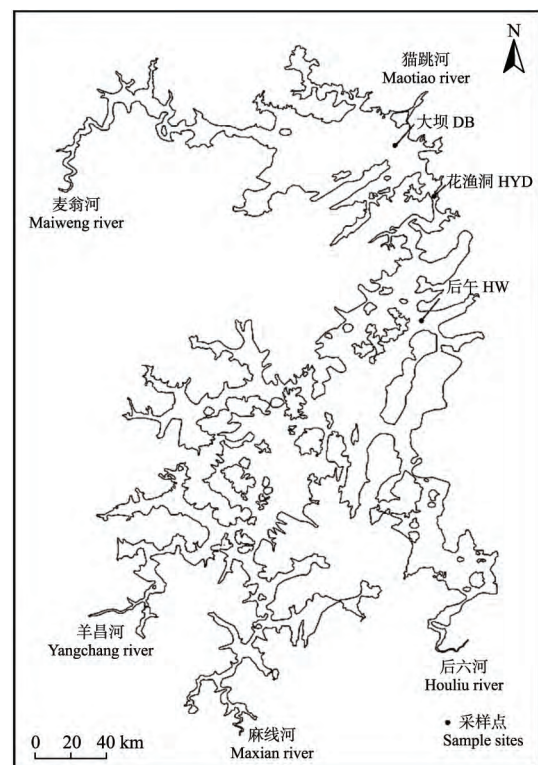


图1 采样点分布示意图

Fig.1 Sampling sites of study area

1.2 水样采集及理化指标分析

采用分层采水器对红枫湖 DB、HYD、HW3 个点采集水样, 将水样放入冰盒中并迅速送回实验室, 样品储存在 4 °C 冷藏室中, 尽快进行理化分析测试; 采集水样的同时水体温度(T)、溶解氧(DO)、pH、叶绿素 a(Chl-a) 采用利用多水质参数仪(YSI6600-V2) 现场测定。水样高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD) 分别采用水质高锰酸盐指数的测定方法(GB 11892—89)、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 11894—1989)、钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)、塞式盘进行测定。

1.3 浮游植物样品采集与分析

利用 25# 浮游生物网于水平、垂直方向呈“∞”缓慢拖网, 将网提出水面, 打开阀门用 100 mL 标本瓶接样品并加入 3%~5% 的甲醛溶液, 作为浮游植物定性样品; 浮游植物定量样品: 每层取 1.5 L 水, 用甲醛溶液固定, 充分摇匀后于实验室静置 24~48 h, 采用虹吸法浓缩于显微镜下进行鉴定与计数, 其具体方法主要参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》(胡鸿钧等, 2006)。浮游植物优势种的优势度: $Y = (n_i / N) \times f_i$, 式中, Y 表示优势度, 将 $Y > 0.02$ 的生物定义为优势种; n_i 指第 i 种的丰度, N 为总丰度, f_i 指该种在各点位中出现的频率。

1.4 富营养化指数评价方法

为进一步了解调查区域水质情况, 选取 TP、TN、COD_{Mn}、Chl-a、SD 作为水体理化特征评价因子, 应用综合营养状态指数对其进行评价。综合营养状态指数(王明翠等, 2002; 鲍广强等, 2018) 的表达式为:

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j) \quad (1)$$

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (2)$$

$$TLI(TP) = 10 \times [9.436 + 1.624 \ln(TP)] \quad (3)$$

$$TLI(TN) = 10 \times [5.453 + 1.694 \ln(TN)] \quad (4)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10 \times [0.109 + 2.661 \ln(COD_{Mn})] \quad (5)$$

$$TLI(SD) = 10 \times [5.118 - 1.94 \ln(SD)] \quad (6)$$

$$TLI(Chl-a) = 10 \times [2.5 + 1.086 \ln(Chl-a)] \quad (7)$$

式中: $TLI(\sum)$ 代表综合营养状态指数, W_j 代表第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数, r_{ij} 为第 j 种参数与 Chl-a

表 1 湖泊 Chl-a 与其他参数之间的相关关系

Table 1 Correlation between Chl-a and other parameters in lake

参数 Parameters	Chl-a	TP	TN	COD _{Mn}	SD
r_{ij}	1	0.84	0.82	0.83	-0.83

表 2 水库营养状态分级

Table 2 Classification for reservoir nutrition level

综合营养状态 指数 TLI(Σ) Trophic status index	营养水平 Nutrition level	综合营养状态 指数 TLI(Σ) Trophic status index	营养水平 Nutrition level
(0, 30]	贫营养 Oligotropher	(50, 60]	轻度富营养 Light eutropher
(30, 50]	中营养 Mesotropher	(60, 70]	中度富营养 Middle eutropher
(50, 100]	富营养 Eutropher	(70, 100]	重度富营养 Hyper eutropher

表 3 藻类丰度与湖泊营养型评价标准

Table 3 Standard of algae cell abundance and the nutrition type of lake

藻类丰度(cells · L ⁻¹) Algae abundance	营养状态 Nutrition level
>10 ⁸	重度富营养 Hyper eutropher
80×10 ⁶ < D ≤ 10 ⁸	富营养 Eutropher
40×10 ⁶ < D ≤ 80×10 ⁶	中富营养 Middle eutropher
10×10 ⁶ < D ≤ 40×10 ⁶	中营养 Mesotropher
≤ 10×10 ⁶	贫营养 Oligotropher

的相关关系(金相灿等, 1990) (表 1), m 代表参评参数个数; (3)~(7) 代表各项目状态指数计算公式, 其中 SD 的单位 m, Chl-a 的单位是 mg · m⁻³, 其余单位均为 mg · L⁻¹。为说明水库营养状况, 对水库营养进行分级, 营养状态分级(李林横等, 2016) 见表 2。

1.5 藻类丰度与湖泊营养型评价标准

藻类丰度与湖泊营养型评价标准见表 3(李磊等, 2015)。

1.6 数据分析

使用 Origin 9.0 对水体理化特征数据、藻类种类及其丰度作图, 使用 SPSS 25.0 对水体理化特征与藻类优势种丰度做双变量相关性分析。

2 结果与分析

2.1 红枫湖水体理化特征

图 2 分别为各采样点于 2014 年全年表层水体温度、pH、DO、Chl-a、TP、TN、SD、COD_{Mn} 的变化。3 个采样点的温度从 1—12 月呈现先升高后降低的趋

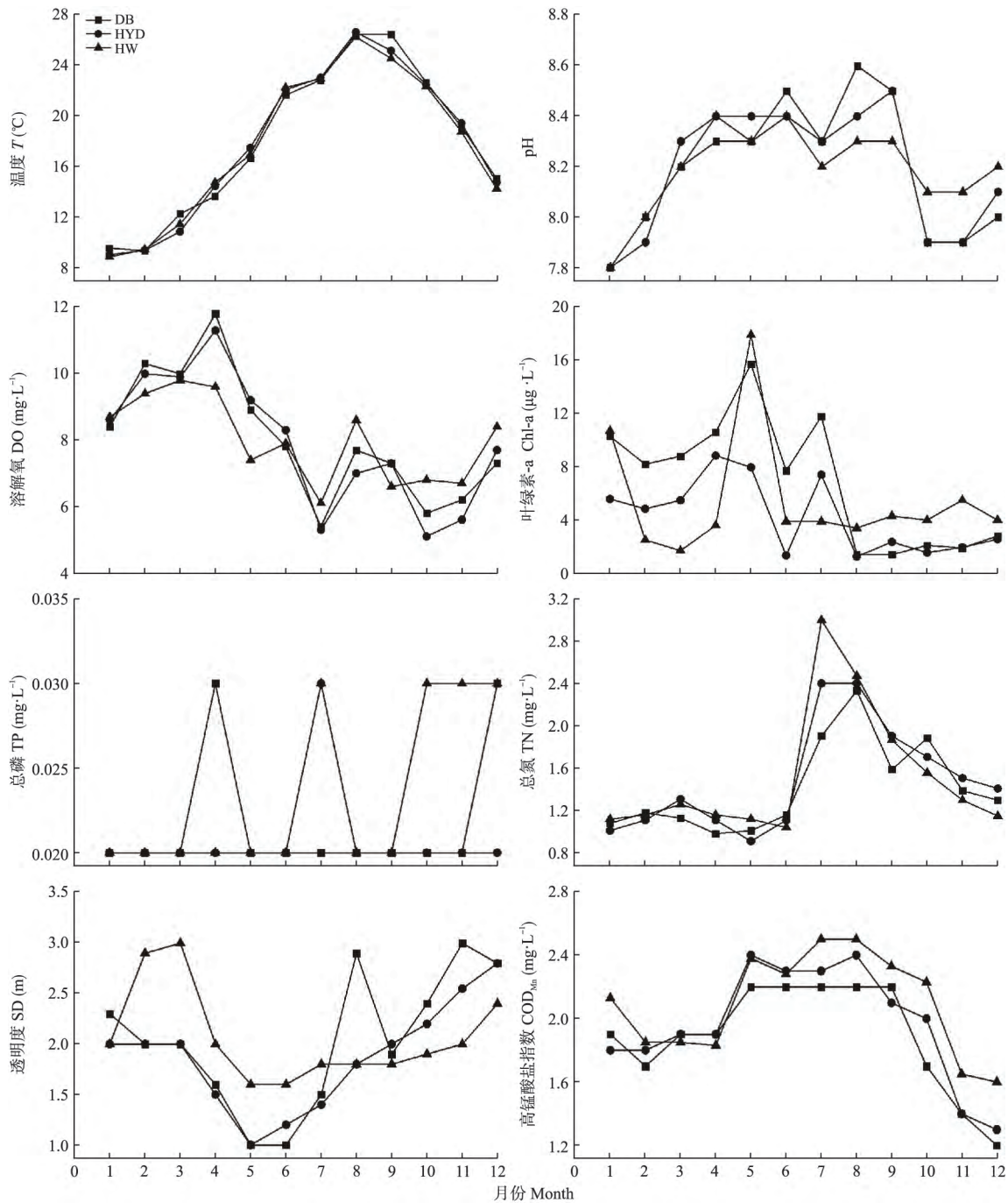


图 2 红枫湖表层水体 T、pH、DO、Chl-a、TP、TN、SD、COD_{Mn}的变化

Fig.2 Variation of T, pH, DO, Chl-a, TP, TN, SD, COD_{Mn} in surface water of Hongfeng Lake

势 其中 1 月温度最低, 8 月温度最高, 变化范围为 8.8~26.6 °C; pH 的变化趋势为: 先升高后降低再升高再降低, 其中 pH 最低出现在 1 月, 最高出现在 8 月, 其变化范围为 7.8~8.6; DO 的变化趋势与 pH 相一致, 其变化范围 5.1~11.8 mg·L⁻¹; Chl-a 呈现出先下降后升高再下降再升高的趋势, 其变化范围为 1.3~17.9 µg·L⁻¹; TP 的变化幅度不大, 其变化范围

为 0.02~0.03 mg·L⁻¹; TN 则呈现先缓慢变化、再增加后降低的趋势, 其中 TN 在 7—8 月达到最大值, 变化范围为 0.91~3.00 mg·L⁻¹; 透明度呈现出先下降后升高的趋势, 其变化范围为 1.0~3.0 m; COD_{Mn} 总体呈现出先升高后降低的趋势, 其变化范围为 1.2~2.5 mg·L⁻¹。由《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 可知, 全年 3 个采样点的 TN 及部分月

份的TP(如DB的12月, HYD的4、7—8、10—12月以及HW的7、10—12月)、DO(如DB的7、10月, HYD的7、10—11月)已超过地表水环境质量标准中的Ⅱ类标准, 甚至部分月份TN(如DB、HYD、HW 7—12月)已超过地表水Ⅲ类水质标准, 建议加强红枫湖周边的排污管理。总体上, 红枫湖水质处于地表水Ⅱ~Ⅲ类。

2.2 红枫湖浮游植物群落结构组成变化

2.2.1 红枫湖浮游植物种(属)及优势种优势度的月度变化 红枫湖DB、HYD、HW 鉴定出浮游植物为7门, 105种(属); 其中, 蓝藻门12种(属)、绿藻门62种(属)、硅藻门22种(属)、甲藻门3种、裸藻门3种(属)、隐藻门1种(属)、金藻门2种(属)。红枫湖主要藻类种(属)的数量随时间的变化关系如图3所示, 其中绿藻门种(属)类较多, 最多出现在7月和10月共44种(属), 种(属)变化范围为30~44; 其次为硅藻门、蓝藻门分别为9~13种(属)、6~11种(属)。

浮游植物群落优势种持续时间最长(持续时间在6个月或以上)的有(表4): 蓝藻门的假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)、绿藻门的双对栅藻(*Scenedesmus bijugatus*)、小球藻(*Chlorella vulgaris*)以及硅藻门的小环藻(*Cyclotella* sp.), 这些是中营养-中富营养湖泊常见藻种(属)(李磊等, 2015; 陈倩等,

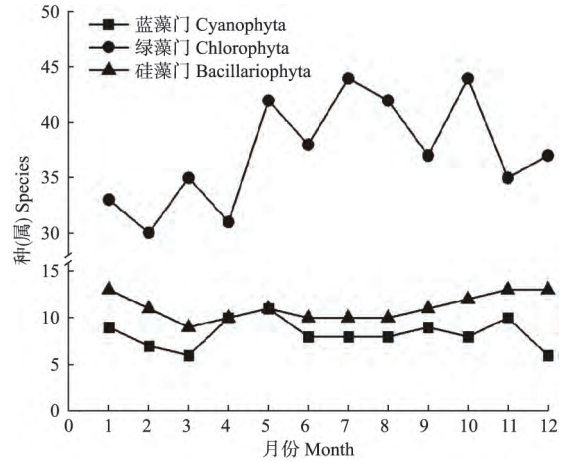


图3 红枫湖主要藻类种(属)数量的时间变化
Fig.3 Variation of main algae species in Hongfeng Lake

2018); 除夏季(7—8月)绿藻门中的双对栅藻、小球藻占绝对优势外, 其余多数月份以蓝藻门的假鱼腥藻占绝对优势。

2.2.2 红枫湖浮游植物丰度变化 红枫湖浮游植物丰度随时间的变化呈现明显的季节性变化(图4), 由1—12月DB、HYD、HW 3个采样点浮游植物丰度变化趋势皆为: 先下降后升高再下降再升高, 这与图2中Chl-a的变化趋势相一致。2014年全年红枫湖藻类丰度变化范围为 $0.1027 \times 10^6 \sim 59.0165 \times 10^6$ cells · L⁻¹; 其中丰度最大出现在5月HYD处,

表4 红枫湖浮游植物主要优势种优势度月度变化

Table 4 Variation of the main dominant species and dominance of phytoplankton in Lake Hongfeng

样点 Sites	种类 Taxon	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
DB	蓝藻门 (Cyanophyta)	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	0.618	-	0.664	0.871	0.935	0.8	-	0.085	0.785	-	0.185	0.328
		湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp.	0.036	0.205	0.241	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	绿藻门 (Chlorophyta)	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijugatus</i>	-	-	-	-	-	-	0.192	0.431	0.044	0.247	0.292	0.317
		单角盘星藻 <i>Pediastrum simplex</i>	-	0.205	-	-	-	-	0.068	0.054	-	0.037	-	-
		鼓藻 <i>Penium</i> sp.	-	-	-	-	-	-	0.132	0.034	-	-	-	-
HYD	绿藻门 (Chlorophyta)	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	-	0.154	-	-	-	-	0.096	0.129	0.044	0.076	-	0.032
	硅藻门 (Bacillariophyta)	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	-	-	-	-	-	0.031	0.128	0.132	0.044	0.402	0.197	0.212
		尖针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	0.072	0.41	-	-	0.027	-	-	-	-	-	-	0.021
HW	蓝藻门 (Cyanophyta)	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	0.607	0.294	0.032	0.945	0.973	0.723	-	0.172	0.821	0.204	0.201	0.052
		颤藻 <i>Oscillatoria prtnceps</i> sp.	-	0.143	0.242	0.022	-	-	-	-	-	-	-	-
	绿藻门 (Chlorophyta)	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijugatus</i>	-	-	0.032	-	-	-	0.402	0.405	0.048	0.219	0.301	0.271
		小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	-	0.034	0.065	-	-	0.041	0.136	0.039	0.032	0.078	0.126	0.076
		卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.	-	0.176	0.097	-	-	-	-	-	-	0.022	-	-
	硅藻门 (Bacillariophyta)	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	-	-	-	-	-	0.096	0.084	0.123	0.025	0.087	0.262	0.486
HW	蓝藻门 (Cyanophyta)	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	0.519	-	0.224	0.525	0.89	0.429	0.071	0.582	0.882	0.227	0.37	0.275
	绿藻门 (Chlorophyta)	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijugatus</i>	0.025	-	0.055	-	-	-	0.177	0.182	-	0.21	0.178	0.163
		小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	-	0.09	0.067	0.02	-	0.075	0.193	0.027	-	0.111	0.164	0.084
	硅藻门 (Bacillariophyta)	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	-	0.139	0.075	-	-	0.137	0.081	0.071	0.029	0.217	0.168	0.235

注: - 表示该月优势度<0.02。

Note: - It indicates <0.02 dominance in the month.

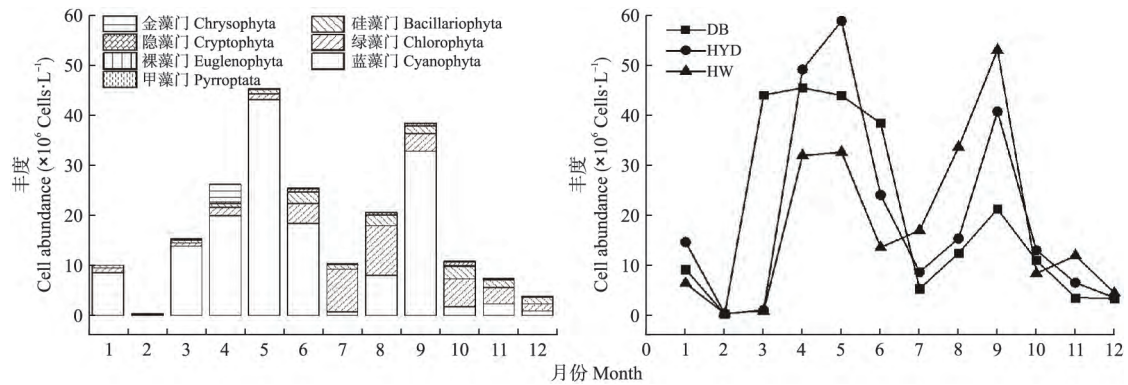


图4 主要藻类组成与藻类丰度的时间变化

Fig.4 Variation of the cell abundance of phytoplankton and main algae composition in Hongfeng Lake from January to December in 2014

为 $59.02 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 最小值出现在2月DB处, 为 $0.10 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。红枫湖全年以蓝、绿藻为主, 硅藻为辅, 甲藻、裸藻、隐藻、金藻偶有出现; 其中1、3—6、9月以蓝藻占绝对优势, 7—8月以绿藻占绝对优势, 这可能是蓝藻、绿藻对温度作出的反映, 即是绿藻较蓝藻对夏季高温表现出更好的适应性, 夏季高温下有助于绿藻的生长, 且高温(7—8月)、低温(当年10月—次年1月)均对蓝藻生长具有一定抑制性(Wu *et al.*, 2013; 贡丹丹等, 2016; 尚帅, 2017), 这与表5所得出的结果相一致。

如图4, 从季节上看, 春秋两季藻类丰度最高(主要为蓝藻)、冬季最低尤其是2月, 这可能与春秋季节水体温度适宜藻类(蓝藻)生长有关。

2.3 红枫湖2014年综合营养状态指数变化

由图5可知, 2014年红枫湖3个采样点综合营养状态指数变化相一致, 其变化趋势皆为先增加后降低再增加再降低, 且都在5、7月达到峰值。结合表3和图5可得出, 红枫湖全年TLI(Σ)介于(30, 50], 处于中营养水平。

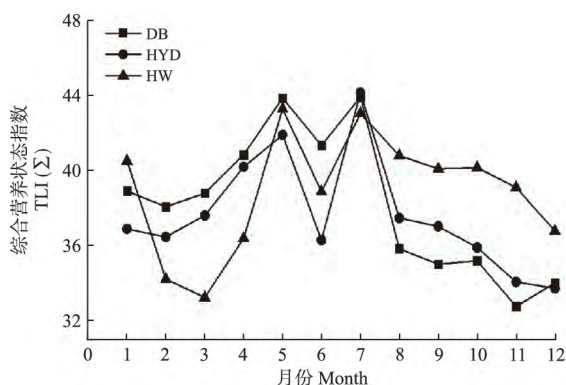


图5 红枫湖营养状态指数

Fig.5 Nutrient state index of Hongfeng Lake

2.4 浮游植物主要优势种丰度与水体理化特征之间的相关性

为探讨各采样点T等7项水体理化特征与浮游植物群落之间的关系, 根据表5的结果对浮游植物群落优势种与水体理化特征做相关性分析, 如表5所示。DB处T与双对栅藻呈显著正相关、与单角盘星藻(*Pediastrum simplex*)呈显著正相关、与小球藻呈显著相关, pH与小球藻呈显著正相关, DO与假鱼腥藻呈显著正相关, Chl-a与双对栅藻呈显著负相关、与尖针杆藻(*Synedra sp.*)呈显著正相关, TN与假鱼腥藻呈显著负相关、与尖针杆藻(*Synedra sp.*)呈显著负相关、与双对栅藻呈显著正相关、与单角盘星藻(*Pediastrum simplex*)呈显著正相关、与小球藻呈显著正相关、与小环藻呈显著正相关, SD与假鱼腥藻呈显著负相关、与尖针杆藻呈显著负相关。同理可分析, 采样点HYD、HW水体理化特征与浮游植物群落之间的相关性, 结果表明(表5), T、DO、TN、SD是影响藻类丰度的主要因素。

3 讨论

3.1 红枫湖综合营养状态评价

红枫湖早期从1994—2007年就出现过大面积黑水、“水华”等水质恶化的现象, 其中1996年红枫湖综合营养状态指数为60.2, 属中度富营养化水体, 到2006年红枫湖处于重度富营养化(陈作州等, 2007; 庞磊等, 2007; 冯业强等, 2011; 孟凡丽等, 2018b)。2008年后由于采取相关工程治理措施, 使得水质逐步改善, 到2013年红枫湖处于中富营养状态, 相应水质介于II~III类, 表明红枫湖水质逐渐向好的趋势转变(黄国佳等, 2015)。综合图2与图5

表 5 浮游植物主要优势种丰度与水体理化特征之间的相关性

Table 5 Correlation of phytoplankton dominant species cell abundance and physicochemical characteristics of water body

采样点 Sites	门 Phylum		水体理化特征						
			T	pH	DO	COD _{Mn}	TP	TN	SD
DB	蓝藻门 Cyanophyta	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	-0.16	0.434	0.611*	0.434	0.182	-0.605*	-0.723**
		湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp.	-0.31	0.017	0.339	0.031	-0.134	-0.242	-0.054
	绿藻门 Chlorophyta	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijugatus</i>	0.639*	0.289	-0.411	0.103	-0.158	0.891**	0.552
		单角盘星藻 <i>Pediastrum simplex</i>	0.599*	0.288	-0.432	0.279	-0.249	0.919**	0.318
	硅藻门 Bacillariophyta	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	0.838**	0.602*	-0.337	0.424	-0.231	0.832**	0.264
		小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.569	-0.068	-0.563	-0.061	-0.171	0.620*	0.268
HYD	蓝藻门 Cyanophyta	尖针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	-0.388	0.087	0.458	0.355	-0.106	-0.650*	-0.617*
		假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	0.084	0.555	0.436	0.31	.a	-0.386	-0.611*
	绿藻门 Chlorophyta	颤藻 <i>Oscillatoria prtnceps</i> sp.	-0.272	0.277	0.613*	0.17	.a	-0.266	-0.2
		双对栅藻 <i>Scenedesmus bijugatus</i>	0.773**	0.172	-0.682*	0.015	.a	0.914**	0.08
	硅藻门 Bacillariophyta	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	0.875**	0.31	-0.736**	0.023	.a	0.635*	-0.096
		卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.	0.542	0.019	-0.44	0.324	.a	0.596*	0.065
HW	蓝藻门 Cyanophyta	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.681*	0.167	-0.538	-0.43	.a	0.394	0.199
		假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	0.438	0.474	-0.254	0.402	-0.437	0.138	-0.477
	绿藻门 Chlorophyta	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijugatus</i>	0.694*	0.149	-0.308	0.468	0.245	0.779**	-0.34
		小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	0.54	0.151	-0.669*	0.305	0.625*	0.683*	-0.417
硅藻门 Bacillariophyta	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.895**	0.369	-0.604*	0.358	0.4	0.49	-0.591*	

注: ** 在 0.01 级别(双尾) 相关性显著, * 在 0.05 级别(双尾) 相关性显著, .a 由于至少有一个变量为常量(HYD 处 TP 含量区分度低) 因此无法计算。

Note: ** Correlation is significant at 0.01 level (2-tailed); * correlation is significant at 0.05 level (2-tailed). .a There is one variable constant at least (total phosphorus concentration is poorly differentiated at HYD) , so it cannot be calculated.

可知, 2014 年全年红枫湖叶绿素 a 的变化趋势与其综合营养状态指数的变化趋势相一致, 这可能与叶绿素 a 是综合营养状态指数的主要贡献因子有关(王彤等, 2017)。根据湖泊营养类型生物学指标评价标准(况琪军等, 2005), 基于 Chl-a, 红枫湖处于中营养状态, 具体表现在 DB 处 1—7 月, HYD 处的 1、3—5、7 月以及 HW 处的 1、5 月。

根据藻类丰度与湖泊营养类型评价标准(表 3) 可知: 2014 年红枫湖处于中富营养状态, 具体表现在: DB 处 3—5 月处于中度富营养状态, 6、8—10 月处于中营养状态, 其余月份处于贫营养状态; HYD 的 4—5、9 月处于中度富营养状态, 1、6、8、10 月处于中营养状态, 其余月份处于贫营养状态; HW 的 9 月处于中度富营养状态, 4—7、11 月处于中营养状态, 其余月份处于贫营养状态。对于红枫湖各采样点处于中富营养状态的时间有差异, 这可能与各采样点所处的水文、水动力条件等有所不同有关。然而, 有关其作用机理需要进一步研究(Verhagen, 1980; Lefebvre *et al.*, 2011; 王铭玮等, 2011; 何爱政等, 2015)。

3.2 红枫湖水体理化特征对浮游植物群落的影响

由表 5 可以看出, 3 个采样点的绿藻都与 T 具有显著相关性, 这与图 4 分析出的绿藻对夏季高温表现出更好的适应性相一致。各采样点 TN 与其绿

藻门的优势种(属) 皆表现出极强的相关性, 结合图 2 中 TN 2014 年的月度变化与图 4 藻类丰度与主要藻类组成的时间变化可知, TN 的月度变化与主要藻类组成的时间变化中的绿藻丰度的变化相一致, 其变化趋势皆为: 2014 年除 2 月绿藻的丰度外, 1—6 月缓慢变化, 7—12 月先升高后降低, 这可能与 TN 的增加能够促进绿藻的生长有关, 这与 Xu 等(2010) 对太湖关于氮、磷的输入控制浮游植物生长的研究结果, 即夏秋两季 N 的增加会促进浮游植物的生长相一致, 由此可推测出, 绿藻丰度可能主要受限 T 和 TN。

各采样点水体理化特征与浮游藻类丰度的相关性既有相似之处, 也有不同之处。比如: DB、HYD、HW 的 TN 与双对栅藻呈显著相关关系; DB 处 DO 与假鱼腥藻呈显著相关关系, 而 HYD、HW 的 DO 与假鱼腥藻则不存在这一关系。三个采样点 T、DO、TN、SD 是影响藻类丰度的主要因素, 这与 Guo 等(2017) 关于太湖北部水体理化特征对浮游植物生物量的影响研究相比, 即是与太湖北部 TP、N/P、T、pH、SD、SS 是浮游植物生物量的主要影响因素存在不一致的地方, 然而与绿藻对于温度较高的夏季更有竞争优势相一致; 与 Jiang 等(2014) 对巢湖浮游植物群落与水体理化特征之间相关性进行比较: 巢湖 T、ORP、DO、PO₄³⁻-P 是浮游植物群落组成的主

要影响因素,这与红枫湖亦存在不一致的地方;此外,Gasiūnaite等(2005)基于盐度和富营养化的影响下波罗的海沿岸浮游植物的变化结果:T是浮游植物群落结构最重要的影响因子,无机N、P与浮游植物群落结构具有显著相关性,Si对于浮游植物群落也有一定的影响,这与本实验结果也存在不一致之处。总之,红枫湖T、DO、TN、SD是影响藻类生长的主要因素。

4 结论

红枫湖水体处于“中营养”至“中度富营养”水平。在监测期,部分月份DO、TP超过地表水Ⅱ类水标准,部分水体TN指标超过地表Ⅲ类水标准。建议加强相关污染物的排放源调查和污染控制。

红枫湖藻类丰度分别在春季(4—5月)和秋初(9月)呈现两个峰值,蓝藻门的假鱼腥藻为主要优势种属。建议强化对红枫湖藻类群落结构的长期监测研究,适时开展藻类水华预防工作。

红枫湖水体藻类丰度受多种环境因素影响,其中T、DO、TN、SD等对藻类丰度的影响最显著,是控制水体藻类生长的主要水体理化特征。

致谢 感谢罗婧、徐洋在野外监测、样品采集及室内化学分析方面给予的帮助。

参考文献

- 鲍广强,尹亮,余金龙,等. 2018. 基于综合营养状态指数和BP神经网络的黑河富营养化评价. 水土保持通报, **38**(1): 264-269. [Bao GQ, Yin L, Yu JL, et al. 2018. Eutrophication evaluation of Heihe River based on comprehensive trophic state index method and BP neural network. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, **38**(1): 264-269.]
- 陈倩,李秋华,胡月敏,等. 2018. 贵州百花水库浮游藻类功能群时空分布特征及影响因子分析. 环境科学研究, **31**(7): 1266-1274. [Chen Q, Li QH, Hu YM, et al. 2018. Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their influencing factors in Baihua reservoir, Guizhou Province. *Research of Environmental Science*, **31**(7): 1265-1274.]
- 陈作州,陈椽,晏妮,等. 2007. 红枫湖水库浮游植物演变(1980—2006年)和富营养化趋势研究. 贵州师范大学学报(自然科学版), (3): 5-10. [Chen ZZ, Chen C, Yan N, et al. 2007. Ecological changes of phytoplankton (1980-2006) in Hongfeng Lake and the study of eutrophication trend. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, (3): 5-10.]
- 冯业强,夏品华,张明时. 2011. 贵州红枫湖水富营养化

- 和蓝藻水华分析. 安徽农业科学, **39**(11): 6733-6734. [Feng YQ, Xia PH, Zhang MS. 2011. Analysis on the eutrophication and blue algae bloom of Hongfeng Lake Reservoir in Guizhou. *Journal of Anhui Agricultural Science*, **39**(11): 6733-6734.]
- 高远,苏宇祥,亓树财. 2008. 沂河流域浮游植物与水质评价. 湖泊科学, **20**(4): 544-548. [Gao Y, Su YX, Qi SC. 2008. Phytoplankton and evaluation of water quality in Yi River watershed. *Journal of Lake Sciences*, **20**(4): 544-548.]
- 贡丹丹,刘德富,张佳磊,等. 2016. 周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响. 环境科学, **37**(6): 2149-2157. [Gong DD, Liu DF, Zhang JL, et al. 2016. Influence of periodic temperature disturbance on the succession of algal community structure. *Environmental Science*, **37**(6): 2149-2157.]
- 何爱敬,刘德富,杨正健,等. 2015. 不同扰动强度对浮游藻类群落结构演替的影响. 环境科学与技术, **38**(5): 53-58. [He AZ, Liu DF, Yang ZJ, et al. 2015. Effect of different disturbance strength on succession of phytoplankton community. *Environmental Science & Technology*, **38**(5): 53-58.]
- 贺蓉,蒋礼,郑曙明,等. 2015. 三峡库区甘井河水域牧场浮游植物群落结构及水质评价. 水生生物学报, **39**(5): 902-909. [He R, Jiang L, Zheng SM, et al. 2015. The study of the community structure of the phytoplankton and the assessment of the water quality in the Ganjing River of the three gorge reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, **39**(5): 902-909.]
- 胡鸿钧,魏印心. 2006. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社. [Hu HJ, Wei YX. 2006. The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology. Beijing: Science Press.]
- 黄国佳,李秋华,陈椽,等. 2015. 贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征. 生态学报, **35**(17): 5573-5584. [Huang GJ, Li QH, Chen C, et al. 2015. Phytoplankton functional groups and their spatial temporal distribution characteristics in Hongfeng Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, **35**(17): 5573-5584.]
- 金灿灿,屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社. [Jin XC, Tu QY. 1990. Investigation Criterion of Lake Eutrophication. Beijing: China Environmental Science Press.]
- 孔繁翔,高光. 2005. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, **25**(3): 589-595. [Kong FX, Gao G. 2005. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, **25**(3): 589-595.]
- 况琪军,马沛明,胡征宇,等. 2005. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. 安全与环境学报, **5**(2): 87-91. [Kuang QJ, Ma PM, Hu ZY, et al. 2005. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. *Journal of Safety and Environment*, **5**(2): 87-91.]

- 李 磊, 李秋华, 焦树林, 等. 2015. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应. *环境科学*, **36**(12): 4436-4443. [Li L, Li QH, Jiao SL, et al. 2015. Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in summer at Xiaoguan reservoir. *Environmental Science*, **36**(12): 4436-4443.]
- 李林衡, 郑 飞, 何春花, 等. 2016. 综合营养状态指数法评价鄞州区水库富营养化程度. *中国给水排水*, **32**(13): 75-78. [Li LH, Zheng F, He CH, et al. 2016. Evaluation of reservoir eutrophication in Yinzhou based on comprehensive eutrophication state index method. *China Water & Wastewater*, **32**(13): 75-78.]
- 孟凡丽, 肖劲松, 王程程, 等. 2018a. 红枫湖流域主要入湖污染物调查与分析评价. *四川环境*, **37**(2): 73-77. [Meng FL, Xiao JS, Wang CC, et al. 2018. Investigation and analysis on the main pollutants into the lake in the Hongfeng lake basin. *Sichuan Environment*, **37**(2): 73-77.]
- 孟凡丽, 肖劲松, 杨 梅, 等. 2018b. 1996 年与 2016 年红枫湖流域 $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP 输入变化与水质响应分析. *环保科技*, **24**(5): 4-8. [Meng FL, Xiao JS, Yang M, et al. 2018. An analysis on input changes of $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, and TP as well as water quality response in Hongfeng lake basin in 1996 and 2016. *Environmental Protection Technology*, **24**(5): 4-8.]
- 闵文武, 王培培, 李丽娟, 等. 2015. 渭河流域浮游植物功能群与水理化特征的关系. *环境科学研究*, **28**(9): 1397-1406. [Min WW, Wang PP, Li LJ, et al. 2015. Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in the Wei River Basin. *Research of Environmental Sciences*, **28**(9): 1397-1406.]
- 庞 磊, 庞增铨. 2007. 红枫湖, 百花湖水体污染事件调查. *环保科技*, **13**(3): 44-48. [Pang L, Pang ZQ. 2007. Investigation of water pollution incidents in Hongfeng and Baihua lake. *Environmental Protection Technology*, **13**(3): 44-48.]
- 尚 帅. 2017. 温度, 光照对长江口几种优势藻类生长的影响研究(硕士学位论文). 上海: 上海师范大学. [Shang S. 2017. Study on Influence of Temperature and Light on the Growth of Several Dominant Algae in Yangtze River Estuary (Master's thesis). Shanghai: Shanghai Normal University.]
- 王 彤, 张 玲, 李英杰, 等. 2017. 陕西瀛湖富营养化特征与控制对策. *水生态学杂志*, **38**(5): 29-34. [Wang T, Zhang L, Li YJ, et al. 2017. Eutrophication characterization and control strategies in Yinhu lake of Shanxi Province. *Journal of Hydrogeology*, **38**(5): 29-34.]
- 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 2002. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. *中国环境监测*, **18**(5): 47-49. [Wang MC, Liu XQ, Zhang JH. 2002. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, **18**(5): 47-49.]
- 王铭玮, 徐启新, 车 越, 等. 2011. 淀山湖蓝藻水华暴发的气象水文因素探讨. *华东师范大学学报(自然科学版)*, (1): 21-31. [Wang MW, Xu QX, Che Y, et al. 2011. Research on the meteorological and hydrological factors of cyanobacteria bloom in lake Dianshan. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (1): 21-31.]
- 王徐林, 张 民, 殷 进. 2018. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素. *湖泊科学*, **30**(2): 431-440. [Wang XL, Zhang M, Yin J. 2018. Composition and influential factors of phytoplankton function groups in lake Chaohu. *Journal of Lake Sciences*, **30**(2): 431-440.]
- 王扬才, 陆开宏. 2004. 蓝藻水华的危害及治理动态. *水产学杂志*, **17**(1): 90-94. [Wang YC, Lu KH. 2004. The harmfulness and treatment dynamics of cyanobacteria bloom. *Chinese Journal Fisheries*, **17**(1): 90-94.]
- 吴庆龙, 谢 平, 杨柳燕, 等. 2008. 湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究. *地球科学进展*, **23**(11): 1115-1123. [Wu QL, Xie P, Yang LY, et al. 2008. Ecological consequences of cyanobacterial bloom in lake and their counter measures. *Advances in Earth Science*, **23**(11): 1115-1123.]
- 徐 洋, 陈敬安, 王敬富, 等. 2016. 氧化还原条件对红枫湖沉积物磷释放影响的微尺度分析. *湖泊科学*, **28**(1): 68-74. [Xu Y, Chen JA, Wang JF, et al. 2016. The micro-scale investigation on the effect of redox condition on the release of the sediment phosphorus in Lake Hongfeng. *Journal of Lake Sciences*, **28**(1): 68-74.]
- 闫苏苏, 雷 波, 刘朔孺, 等. 2018. 长寿湖浮游植物功能群季节变化及影响因子. *水生态学杂志*, **39**(3): 52-60. [Yan SS, Lei B, Liu SR, et al. 2018. Seasonal variation of phytoplankton functional groups in Changshou lake and relevant environmental factors. *Journal of Hydroecology*, **39**(3): 52-60.]
- 晏 妮. 2006. 贵州两种类型喀斯特水库浮游植物分布与富营养化特征比较研究(硕士学位论文). 贵阳: 贵州师范大学. [Yan N. 2006. The comparison study of the distribution of the phytoplankton and eutrophication features of two kinds of karst reservoirs in Guizhou (Master's thesis). Guiyang: Guizhou Normal University.]
- 杨通铨, 刘鸿雁, 喻阳华. 2014. 红枫湖水水质变化趋势及原因分析. *长江流域资源与环境*, (S1): 96-102. [Yang TQ, Liu HY, Yu YH. 2014. Variation trend of water quality and its causing effect of the Hongfeng lake. *Resources and Environment in Yangtze Basin*, (S1): 96-102.]
- Biggs J, Von Fumetti S, Kelly-Quinn M. 2017. The importance of small waterbodies for biodiversity and ecosystem services: Implications for policy makers. *Hydrobiologia*, **793**: 3-39.
- Cui L, Lu X, Dong Y, et al. 2018. Relationship between phytoplankton community succession and environmental parameters in Qinhuangdao coastal areas, China: A region with recurrent brown tide outbreaks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **159**: 85-93.
- Dokulil MT, Teubner K. 2000. Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, **438**: 1-12.
- Gabyshev VA, Gabysheva OI. 2010. Water quality of the Anabar

- River indicated by phytoplankton structure and hydrochemical characteristics. *Contemporary Problems of Ecology*, **3**: 395–400.
- Gasiūnaite ZR, Cardoso AC, Heiskanen AS, et al. 2005. Seasonality of coastal phytoplankton in the Baltic Sea: Influence of salinity and eutrophication. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **65**: 239–252.
- Guo W, Zhu Y, Fu Z, et al. 2017. Influences of environmental factors on biomass of phytoplankton in the northern part of Tai Lake, China, from 2000 to 2012. *Environmental Monitoring and Assessment*, **189**: 608.
- Jiang YJ, He W, Liu WX, et al. 2014. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu). *Ecological Indicators*, **40**: 58–67.
- Landsberg JH. 2002. The effects of harmful algal blooms on aquatic organisms. *Reviews in Fisheries Science*, **10**: 113–390.
- Lefebvre A, Guiselin N, Barbet F, et al. 2011. Long-term hydrological and phytoplankton monitoring (1992–2007) of three potentially eutrophic systems in the eastern English Channel and the Southern Bight of the North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, **68**: 2029–2043.
- Liu X, Qian K, Chen Y, et al. 2016. A comparison of factors influencing the summer phytoplankton biomass in China's three largest freshwater lakes: Poyang, Dongting, and Taihu. *Hydrobiologia*, **792**: 283–302.
- Paerl HW, Huisman J. 2008. Blooms like it hot. *Science*, **320**: 58–58.
- Reynolds CS. 2006. *The Ecology of Freshwater Phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Straková L, Kopp R, Maršáľková E, et al. 2013. Dynamics of the cyanobacterial water bloom with focus to *Microcystis* and its relationship with environmental factors in Brno reservoir. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, **61**: 1383–1390.
- Verhagen JHG. 1980. The role of hydrodynamics in eutrophication. *Hydrobiological Bulletin*, **14**: 47–54.
- Wu P, Deng JM, Qin BQ, et al. 2013. Effects of enhanced water temperature and nutrient concentration on algal growth in winter and spring season in Lake Taihu, China. *Research of Environmental Sciences*, **26**: 1064–1071.
- Xu H, Paerl HW, Qin B, et al. 2010. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, **55**: 420–432.
-
- 作者简介 金祖雪 男,1994年生,硕士研究生,主要研究方向为水域生态学。E-mail: zxjin.gzu@foxmail.com
责任编辑 魏中青
-